

УДК 669.042

*М. Д. Казяев\**, *А. М. Вохмяков\**, *Е. В. Киселев\**, *Д. И. Спитченко\**,  
*Д. М. Казяев\*\**, *А. О. Еремин\*\*\**

\* ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

институт материаловедения и металлургии,

кафедра «Теплофизика и информатика в металлургии»,

г. Екатеринбург, Россия,

\*\* ООО «НПК «УралТермоКомплекс», г. Екатеринбург, Россия,

\*\*\* Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ КАМЕРНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ С РАЗЛИЧНЫМИ СИСТЕМАМИ ОТОПЛЕНИЯ И КОНСТРУКЦИЯМИ ФУТЕРОВОК**

### **Аннотация**

*Повышение качества продукции машиностроения зависит от окончательной тепловой и механической обработки выпускаемых изделий.*

*К такой обработке относится термическая обработка металлопродукции в целях получения необходимых физико-механических свойств.*

*На Уралмашизаводе термообработка крупных поковок (роторов турбин, валков прокатных станов) производится в камерных вертикальных печах.*

*До недавнего времени эти печи, имеющие основной размер – высоту, строили с применением кирпичной многослойной футеровки и оснащали большим количеством горелок для обеспечения надлежащей равномерности нагрева продукции.*

*Массивная футеровка печи и длительные режимы приводили к значительным затратам топлива.*

*В целях энергосбережения в настоящее время проводится техническое перевооружение этих печей с применением эффективных волокнистых футеровок, позволяющих существенно снизить тепловые потери теплопроводностью и аккумуляцией стенками печи.*

*Для обеспечения равномерности нагрева изделий на печах устанавливают рекуперативные скоростные горелки, подогревающие воздух для горения газа до высоких температур.*

*Управление сложными температурными режимами потребовало внедрения комплексной автоматизации.*

*На Уралмашизаводе было проведено такое техническое перевооружение вертикальной печи № 22.*

*Ключевые слова: термическая обработка, ротор турбины, валок прокатного стана, вертикальная термическая печь, техническое перевооружение, скоростная рекуперативная горелка, волокнистая футеровка, теплотехнические исследования.*

## Abstract

*Improving the quality of engineering products depends on the final thermal and mechanical processing of the products.*

*By this treatment applies heat treatment of steel in order to obtain the necessary physical and mechanical properties .*

*Uralsmashplant heat treatment of large forgings (turbine rotors , rolling mills) produced in the vertical chamber ovens.*

*Until recently, these ovens having a major dimension - height, built using a multilayer brick lining and equip a large number of burners to ensure adequate homogeneity of the heating products.*

*Massive furnace lining and long regimes led to significant costs of fuel.*

*To save energy is currently being re-equipment these furnaces with effective fiber lining to significantly reduce heat loss and thermal conductivity accumulation walls of the furnace .*

*To ensure homogeneity of the heating furnaces products establish regenerative speed burners , heated air for combustion gas to high temperatures.*

*Management of complex -temperature required the introduction of integrated automation .*

*Uralsmashplant was conducted such technical upgrading vertical furnace number 22.*

*Keywords: heat treatment, the turbine rotor, roller mill, vertical heat treatment furnace, modernization, speed recuperative burner, fibrous lining, thermal engineering research.*

Вертикальные печи для термической обработки крупных поковок типа роторов турбин, валков прокатных станов и др. применяют в основном на машиностроительных заводах.

Особенностью геометрии рабочего пространства вертикальной печи является высота, которая может достигать 20 метров.

Возникающий геометрический напор заставляет греющие газы подниматься вверх, что создает прецедент неравномерности нагрева поковок. Поэтому в целях сокращения перепадов температур по высоте нагреваемого изделия в вертикальных печах прежних конструкций отвод продуктов горения осуществляли через канал, расположенный в поду печи, соединенный с боровом и дымовой трубой.

Горелочные устройства в больших количествах располагали, как правило, тангенциально к внутренней поверхности кладки в несколько ярусов по высоте печи, обеспечивая тем самым равномерный подвод тепла к нагреваемым изделиям. Но это создавало значительные трудности при осуществлении сложных режимов в отсутствие надежной системы автоматизации.

Другой особенностью вертикальных печей является выполнение сложных многоступенчатых температурных режимов термической обработки, состоящих из нескольких временных периодов подъема температуры печи, чередующихся с периодами выдержки с целью выравнивания температуры по объему печи и по поверхности и массе нагреваемых изделий. При этом подъем температуры печи может производиться с различными скоростями от 20 до 120 °С/ ч в зависимости от вида термической обработки.

Следующей особенностью прежних конструкций вертикальных печей является футеровка, состоящая из огнеупорного и теплоизоляционного слоев, выполненных стандартным шамотным кирпичом. При этом снаружи кладка закрыта стальным кожухом, обеспечивающим строительную устойчивость всей конструкции печи.

Массивная кладка вертикальных печей не позволяла поднимать температуру рабочего пространства с высокими скоростями и быстро охлаждать садку вместе с печью, если это требовалось по режиму термической обработки изделий.

Как видно из сказанного выше, обеспечение равномерности нагрева изделий в вертикальных печах зависело от количества и конструкции установленных на них горелочных устройств.

Длительное время эти печи оснащали горелками типа ГНП разных модификаций, не обладающих значительным диапазоном регулирования тепловой мощности и коэффициента избытка воздуха, что в сильной степени сдерживало увеличение производительности печей, особенно в области низкотемпературных режимов, требующих высокой степени равномерности нагрева и охлаждения изделий, которые могли обеспечиваться только за счет интенсивного газодинамического режима.

Для поддержания положительного давления и соответствующих скоростей движения газов в рабочем пространстве печи приходилось вводить дополнительно воздух, увеличивая коэффициент его избытка.

На машиностроительных заводах до сих пор эксплуатируют вертикальные термические печи с отмеченными конструктивными особенностями.

Управление тепловым режимом печи (подачей газа и воздуха горения) производится, как правило, по аналоговому принципу, когда по расходу газа подстраивается расход воздуха по зонам регулирования. Недостатком этой схемы управления является большое различие в расходах газа и воздуха при подъемах температуры печи и при выдержках.

А если учесть, что время выдержки печи назначается технологами в зависимости от массы и размеров нагреваемых изделий и является длительным, то понятно, что горелки большую часть режима работают не в номинальном режиме, что в свою очередь приводит к снижению скорости движения газов в рабочем пространстве и уменьшению конвективной составляющей теплообмена, особенно необходимой при низкотемпературных режимах.

Технический прогресс внес ряд поистине революционных преобразований в технологию сжигания газа и в производство новых футеровочных материалов, сочетающих в себе и огнеупорные и теплоизоляционные свойства.

Современные горелочные устройства обеспечивают устойчивое сжигание газа в широком диапазоне его расхода и коэффициента избытка воздуха за счет ступенчатого (постепенного) горения внутри корпуса горелки, что обеспечивает высокие скорости выхода продуктов горения. Поэтому эти горелки получили название скоростных.

Дальнейшее совершенствование конструкций скоростных горелок обеспечило совмещение теплообменного аппарата с корпусом горелки для подогрева воздуха горения. В результате скоростные горелки получили дополнительное название – рекуперативные.

Новые футеровочные материалы полностью изменили технологию строительства нагревательных и термических печей, обеспечили блочную сборку элементов конструкций стен и сводов и позволили резко уменьшить тепловые потери вследствие теплопроводности и аккумуляции.

В последнее время на машиностроительных заводах России произведено техническое перевооружение нескольких вертикальных термических печей с применением новых конструкций горелочных устройств и современных волокнистых футеровочных материалов.

В частности, на ОАО Уралмашзаводе полностью обновлена вертикальная печь № 22 для термообработки роторов турбин с использованием рекуперативных горелок, волокнистых футеровочных блоков, современной комплексной автоматики управления тепловым режимом как на стадии нагрева изделий, так и в период их охлаждения.

В данном сообщении приведены результаты сравнительного анализа тепловой работы двух идентичных вертикальных термических печей УЗТМ прежней и новой конструкции.

Вертикальная печь № 23 была подвергнута полному теплотехническому обследованию в связи с частичной модернизацией, связанной с заменой горелок ГНП на новые (для того времени – 1989 год) скоростные горелки конструкции Уралмашзавода (автор – инж. А. В. Баков). Схематично конструкция печи показана на рис. 1.

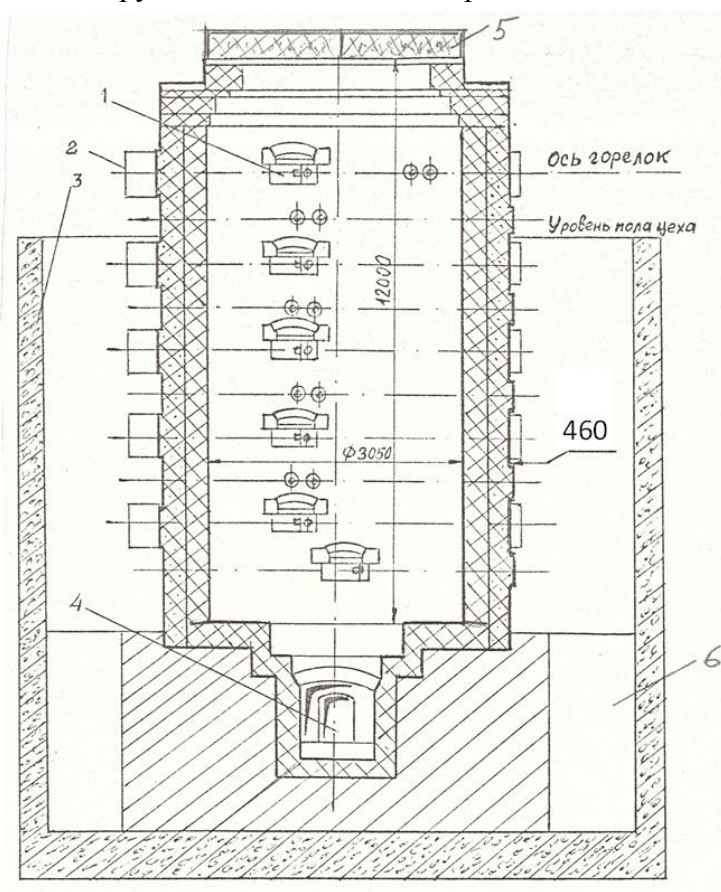


Рис. 1. Вертикальная термическая печь № 23 цеха № 37 УЗТМ:

- 1 – горелка; 2 – площадка обслуживания горелок; 3 – бетонный кессон;
- 4 – канал для отвода дыма; 5 – крышка, состоящая из двух раздвигающихся половин; 6 – приямок для сбора и отвода от борова грунтовых вод

Скоростная горелка конструкции Уралмашзавода представлена на рис. 2, а техническая характеристика печи – в табл. 1.

При капитальном ремонте печи 50 горелок ГНП-2 были заменены на 12 скоростных горелок, расположенных тангенциально к внутренней поверхности кладки.

Футеровка печи выполнена по стандартной кирпичной технологии в виде двухслойной цилиндрической стенки. Крышка печи, состоящая из двух половин, раздвигается с помощью цепного механизма. Для обслуживания горелок на каждом ярусе установлены площадки, соединенные между собой промежуточными лестницами.

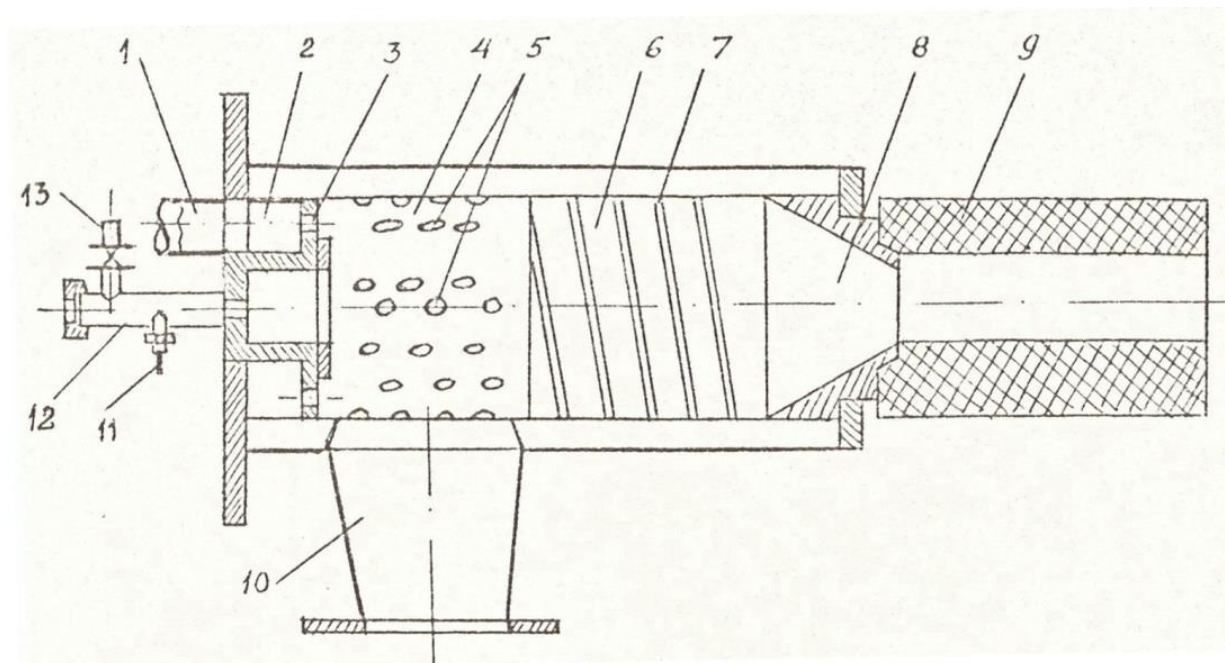


Рис. 2. Скоростная горелка УЗТМ:

- 1 – патрубок для подачи газа; 2 – газораспределительная камера; 3 – отверстия для подачи газа в камеру горения; 4 – первая ступень камеры горения; 5 – отверстия для подачи воздуха в первую ступень горения; 6 – вторая ступень камеры горения; 7 – щелевые отверстия для подачи воздуха во вторую ступень горения; 8 – металлическое сопло; 9 – керамическое сопло; 10 – патрубок подачи воздуха; 11 – запальная свеча; 12 – патрубок запального устройства; 13 – патрубок с краном для подсоса атмосферного воздуха при зажигании горелки

Исследование тепловой работы печи было проведено при нагреве ротора турбины массой  $G_m = 37180$  кг с целью нормализации по сложному температурному режиму:

- начальная температура печи –  $t_{\text{печ.нач.}} = 250$  °C;
- первый период подъема температуры печи до  $720$  °C  $\tau_I = 22$  ч со скоростью  $\sim 20$  °C/ч;
- выдержка при температуре печи  $720$  °C за время  $\tau_{II} = 15$  ч;
- подъем температуры печи от  $720$  °C до  $960$  °C со скоростью  $20$  °C/ч за время  $\tau_{III} = 12$  ч;
- выдержка печи при температуре печи  $960$  °C за время  $\tau_{IV} = 24$  ч;
- общее время нагрева ротора составило  $\tau_{\Sigma} = 73$  ч.

Таблица 1

## Техническая характеристика печи № 23

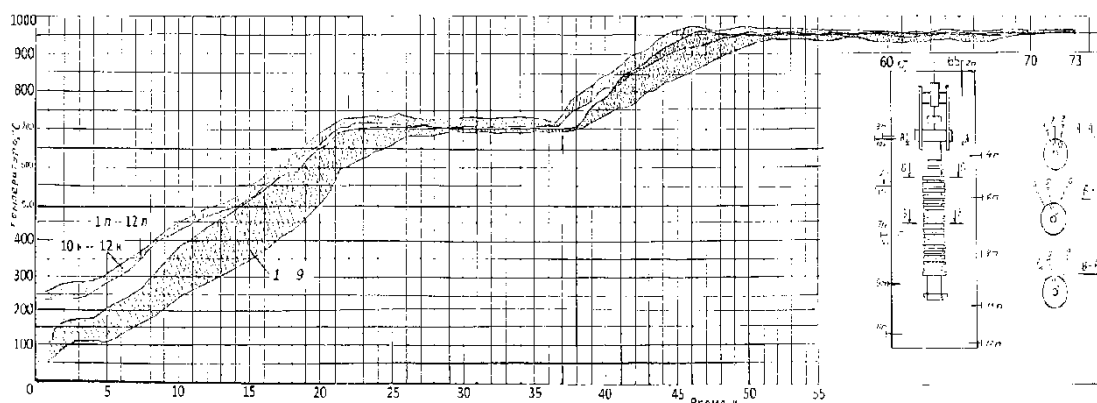
№ п/п	Наименование параметра	Единицы измерения	Величина
1	Геометрические размеры:		
	– высота рабочего пространства;	м	12,0
	– внутренний диаметр;	м	3,05
	– объем рабочего пространства;	м <sup>3</sup>	87,63
	– наружная поверхность по кожуху печи;	м <sup>2</sup>	150
	– внутренняя поверхность стен;	м <sup>2</sup>	114,9
	– футеровка стен:		
	– огнеупорный слой – шамот;	мм	230
	– теплоизоляция – ШЛ.	мм	230
2	Топливо: природный газ, теплота сгорания, $Q_p^H$	кДж/м <sup>3</sup>	33119
3	Температура топлива и воздуха	°С	20
4	Горелочные устройства: – скоростные, конструкции УЗТМ в количестве; – номинальный расход газа на горелку.	Шт.	12
		м <sup>3</sup> /ч	60
5	Максимальная температура печи	°С	1150
6	Дымоудаление: через канал в поду печи, боров и в дымовую трубу	–	–
7	Режимы термообработки изделий: – нагрев под закалку; – нормализация; – отпуск.	°С	1150
		°С	950
		°С	600–650

В целях выявления степени равномерности нагрева ротора на нем были установлены термопары, соединенные с многоточечным потенциометром.

Установка термопар и температурный режим нагрева ротора и печи представлены на рис. 3.

В целях выявления особенностей тепловой работы печи, впервые оснащенной скоростными горелками, но имеющей традиционную кирпичную футеровку, были проведены измерения различных параметров, позволивших составить тепловые балансы как по отдельным периодам нагрева ротора, так и в целом за весь режим его термической обработки (табл. 2).

Особенностью эксплуатации печи являлось отсутствие подогрева воздуха горения и неудовлетворительное состояние приборов автоматики, что потребовало ведения процесса нагрева ротора в ручном режиме. Тем не менее, анализируя температурный режим печи, необходимо отметить, что были выдержаны скорости подъема температуры в области низких и высоких температур нагрева ротора. Но при подъемах температур наблюдался их значительный разброс по высоте рабочего пространства и по поверхности изделия. Длительные выдержки печи при постоянной температуре устраняли неравномерность температурного поля и по объему печи и по поверхности и массе металла.



///// Область изменения температур печи по зонам,

\\\\\\\\ Область изменения температур в различных точках ротора,

1 п – 12 п – рабочие термопары для ведения режима,

10 к – 12 к – контрольные термопары,

1 – 9 – термопары, установленные в роторе

Рис. 3. Температурный режим термической печи № 23 при нагреве ротора массой 37,18 т

Завышенная длительность выдержек, как нам кажется, является неоправданной, поскольку прогрев изделия по сечению происходит достаточно быстро, а с точки зрения структурных превращений в металле такой длительности не требуется.

Таблица 2

Тепловые балансы печи № 23 по отдельным периодам режима нагрева и в целом за весь режим

Статьи теплового баланса и показатели работы печи, $\frac{\text{кВт}}{\%}$	Температура печи, $^{\circ}\text{C}$				
	250–720	720	720–960	960	250–960
Приход теплоты (химическая теплота топлива)	<u>931,5</u> 100	<u>637,0</u> 100	<u>1132,5</u> 100	<u>1274,4</u> 100	<u>1016,7</u> 100
Теплота, затраченная на нагрев металла	<u>180,0</u> 19,3	<u>5,5</u> 0,9	<u>165,0</u> 14,6	<u>5,9</u> 0,5	<u>84,5</u> 8,31
Потери теплоты с уходящими газами	<u>197,9</u> 21,2	<u>456,5</u> 71,6	<u>417,5</u> 36,8	<u>1018,4</u> 79,9	<u>556,8</u> 54,76
Потери теплоты теплопроводностью через футеровку	<u>116,0</u> 12,5	<u>175,0</u> 27,5	<u>212,2</u> 18,7	<u>250,0</u> 19,6	<u>188,0</u> 18,49
Потери теплоты с приспособлениями (подвесная система)	<u>33,7</u> 3,6	<u>0,0</u> 0,0	<u>31,1</u> 2,7	<u>0,0</u> 0,0	<u>15,3</u> 1,5
Аккумуляция теплоты футеровкой	<u>403,9</u> 43,4	<u>0,0</u> 0,0	<u>306,7</u> 27,2	<u>0,0</u> 0,0	<u>172,1</u> 19,94
Время периодов нагрева, ч	22	15	12	24	73
Средний за период расход топлива, $\text{м}^3/\text{ч}$	101,3	69,3	123,1	138,5	110,5
Удельный расход топлива, $\text{кг у.т./т}$	67,7	31,6	44,9	101,0	245,2

Примечание: Основные показатели работы печи:

– КПД суммарный  $\eta_{\Sigma} = 8,31 \%$ ;

– удельный расход топлива  $\epsilon = 247 \text{ кг у.т. /т.}$

С теплотехнической точки зрения данная термическая печь работала удовлетворительно при подъеме температуры рабочего пространства с КПД 15–20 %, но в целом за весь режим термической обработки КПД печи очень низкий (8 %). Причиной этому являются неоправданно длительные выдержки при постоянной температуре печи.

На отдельных этапах работы печи удельные расходы топлива были приемлемыми для того периода времени эксплуатации печей.

Обращают на себя внимание значительные потери теплоты с уходящими газами, особенно во время выдержек печи при постоянной температуре, когда для выравнивания температуры печи и металла приходилось резко увеличивать коэффициенты избытка воздуха до значений  $\alpha = 2,5$  для поддержания интенсивного газодинамического режима.

Футеровка печи также требует значительных затрат тепла и для восполнения потерь теплоты, теряемой теплопроводностью, и для аккумуляции тепла в периоды подъема температуры.

В качестве выводов по результатам проведенных исследований необходимо отметить следующее:

1. Скоростные горелки конструкции УЗТМ позволили интенсифицировать газодинамический режим вертикальной печи, усилить конвективную составляющую внешнего теплообмена.
2. Теплотехнические показатели работы печи могут быть в дальнейшем улучшены при замене кирпичной футеровки на современную с меньшими коэффициентами теплопроводности и плотностью материалов.
3. Необходим подогрев воздуха, подаваемого для горения газа в целях экономии последнего.
4. Явно просматривается необходимость внедрения комплексной автоматики управления тепловым режимом печи, поскольку температурное поле газов по высоте рабочего пространства в период подъема температуры имеет значительную неравномерность.

Для осуществления изложенных предложений на УЗТМ в 2012–2013 гг. была подвергнута техническому перевооружению вертикальная термическая печь № 22 со следующими изменениями:

- 1 – скоростные горелки УЗТМ заменены на скоростные рекуперативные горелки немецкой фирмы «Kromshroeder»;
- 2 – футеровка печи выполнена на основе керамо-волоконистых блоков;
- 3 – установлена комплексная автоматика управления тепловым и электрическим режимом печи (АСУ ТП);
- 4 – выполнена новая механизация перемещения и уплотнения крышки печи.

После пусконаладочных работ были проведены режимные испытания печи при нагреве поковки ротора турбины.

Далее изложены условия и результаты исследования тепловой работы модернизированной печи.

Схематично конструкция печи с установленным в ней ротором представлена на рис. 4, а на рис. 5 показан общий вид футеровки печи керамо-волоконистыми блоками чешской фирмы «Keratech».



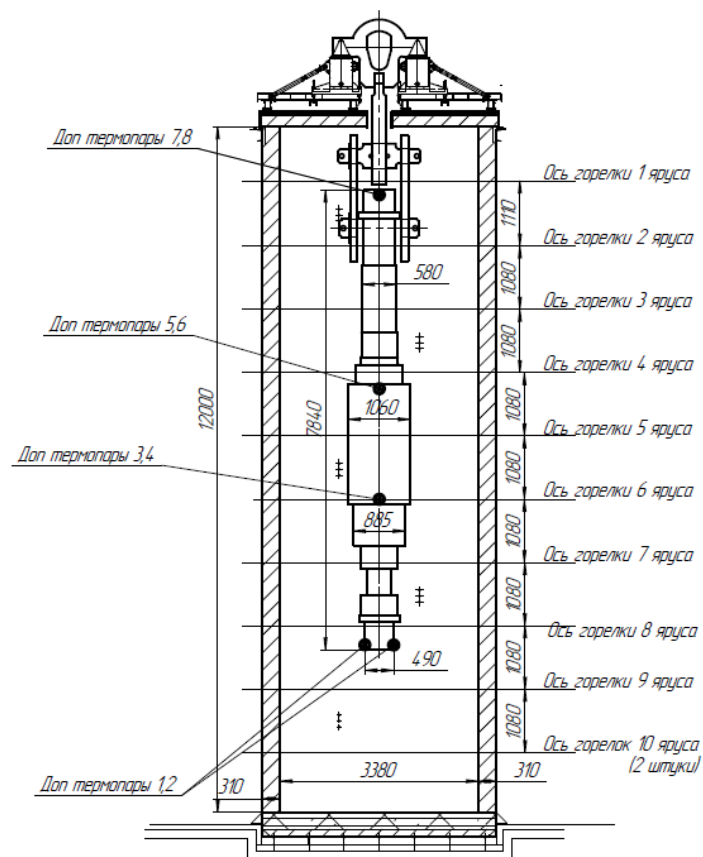


Рис. 4. Конструкция печи № 22 с установкой опытного ротора массой 27,26 т, и размещение основных (печных) и дополнительных (на металле) термопар

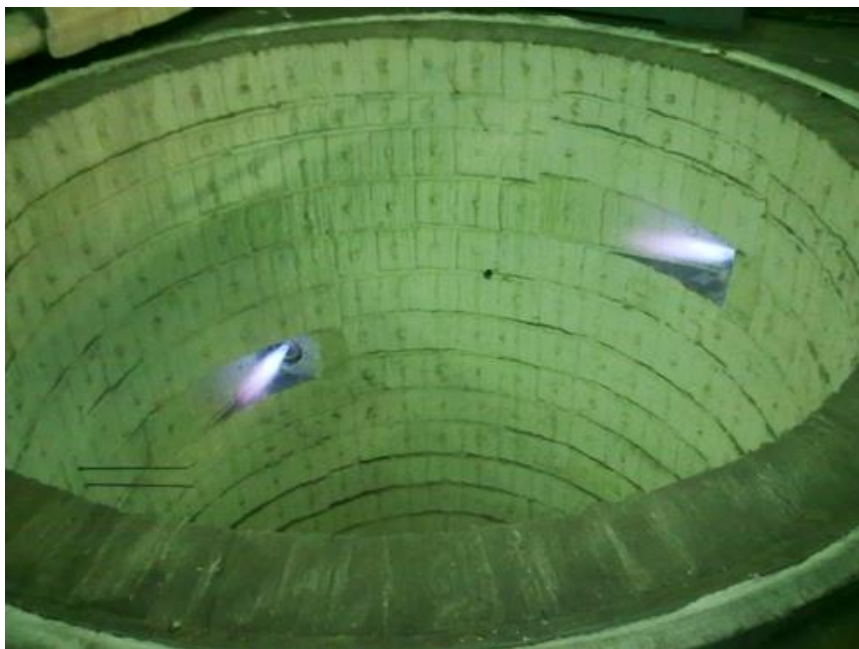


Рис. 5. Общий вид футеровки печи керамо-волокнистыми блоками и установка горелок

Конструкция рекуперативной горелки Есомах представлена на рис. 6.

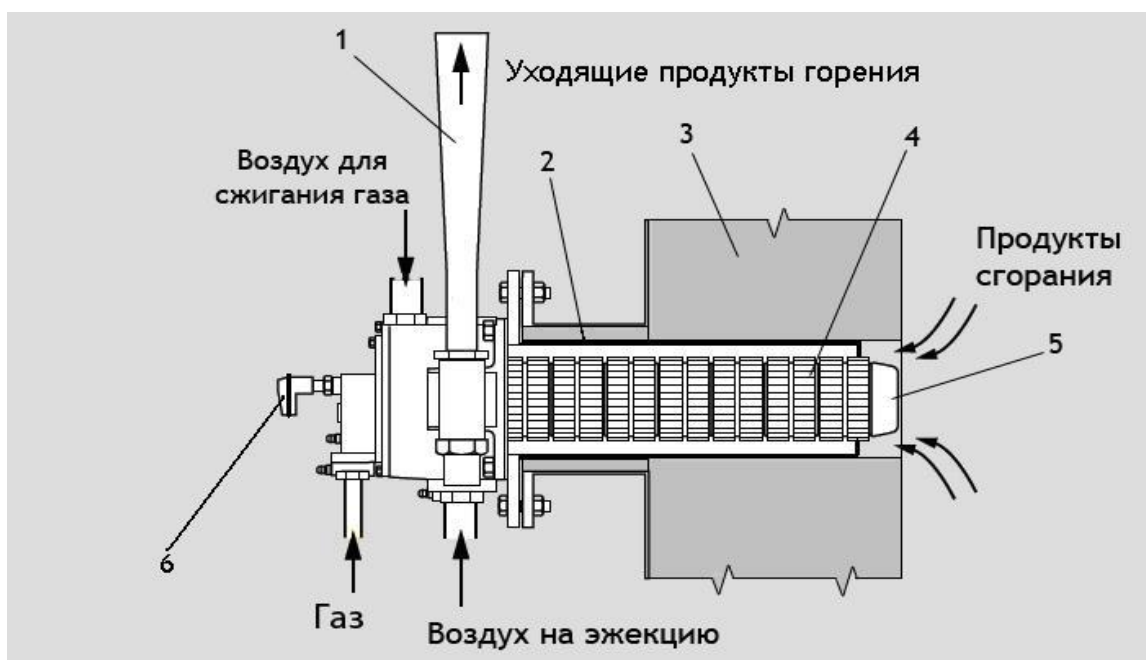


Рис. 6. Конструкция горелки Есмах:

1 – эжектор; 2 – жаровая труба; 3 – футеровка печи; 4 – рекуператор;  
5 – носик горелки; 6 – электрод зажигания и контроля пламени

Техническая характеристика печи дана в табл. 3.

Исследование тепловой работы печи новой конструкции было проведено при нагреве ротора турбины массой 27,26 т по сложному температурному режиму с целью нормализации:

- начальная температура печи –  $t_{\text{печ.нач.}} = 100^{\circ}\text{C}$ ;
- первый период подъема температуры печи за время  $\tau_I = 25$  ч со скоростью  $24^{\circ}\text{C/ч}$  до  $700^{\circ}\text{C}$ ;
- выдержка при температуре  $700^{\circ}\text{C}$  в течение времени  $\tau_{II} = 16$  ч;
- подъем температуры печи от  $700^{\circ}\text{C}$  до  $940^{\circ}\text{C}$  за  $\tau_{III} = 4$  ч со скоростью  $60^{\circ}\text{C/ч}$ ;
- выдержка при температуре печи  $940^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau_{IV} = 20$  ч;
- подъем температуры печи до  $960^{\circ}\text{C}$  за  $\tau_V = 1$  ч;
- выдержка при температуре печи  $960^{\circ}\text{C}$ , в течение времени  $\tau_{VI} = 12$  ч;
- общее время нагрева ротора составило  $\tau_{\Sigma} = 78$  ч.

Температурный режим нагрева ротора показан на рис. 7, из которого видно, что температура печи практически равномерно по всей высоте изменяется в соответствии с заданными скоростями подъема, а выдержка температуры происходит с точностью  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Это говорит о правильно выбранной схеме отопления печи и об устойчивой работе АСУ ТП, управляющей подачей газа и воздуха к горелкам в импульсном режиме «включено-выключено».

Техническая характеристика печи № 22

№ п/п	Наименование параметра	Единицы измерения	Величина
1	Геометрические размеры:		
	– высота рабочего пространства;	м	12,0
	– внутренний диаметр;	м	3,38
	– объем рабочего пространства;	м <sup>3</sup>	107,62
	– наружная поверхность по кожуху печи;	м <sup>2</sup>	154
	– внутренняя поверхность стен;	м <sup>2</sup>	127,4
	– футеровка стен:		
	– керамо-волокнистые блоки;	мм	300
	– прошивной мат.	мм	50
2	Топливо: природный газ, теплота сгорания, $Q_p^p$	кДж/м <sup>3</sup>	34000
3	Температура подогрева воздуха (максимальная)	°С	385
4	Горелочные устройства: – скоростные, рекуперативные горелки немецкой фирмы «Kromshroeder»; – номинальный расход газа на горелку;	шт	11
		м <sup>3</sup> /ч	25
5	Максимальная температура печи	°С	1200
6	Дымоудаление: через рекуперативные горелки с помощью дымососа в металлическую дымовую трубу	–	–
7	Режимы термообработки изделий: – нагрев под закалку; – нормализация; – отпуск.	°С	1200
		°С	980
		°С	600...650

По результатам исследования работы печи составлен тепловой баланс за весь период термической обработки ротора (табл. 4).

Комментируя структуру теплового баланса, необходимо отметить следующее:

- на тепловые показатели работы печи влияет длительность режима термообработки;
- выдержки температуры составляют 60 %, при которых металл практически не получает тепло, что прежде всего сказывается на низком значении КПД и высоком удельном расходе топлива.

Основные показатели тепловой работы печи составили:

- суммарный КПД  $\eta_{\Sigma} = 11,7 \%$ ;
- топливный КПД  $\eta_T = 14,8 \%$ ;
- удельный расход топлива за весь режим  $v = 147,5$  кг у.т./т.

Тем не менее, структуру теплового баланса печи № 22 необходимо сравнивать со структурой баланса печи № 23 (см. табл. 2).

Необходимо отметить, что сравнение отдельных статей баланса вполне корректно, поскольку теплота сгорания топлива, длительность режима и масса нагреваемого изделия практически одинаковые.

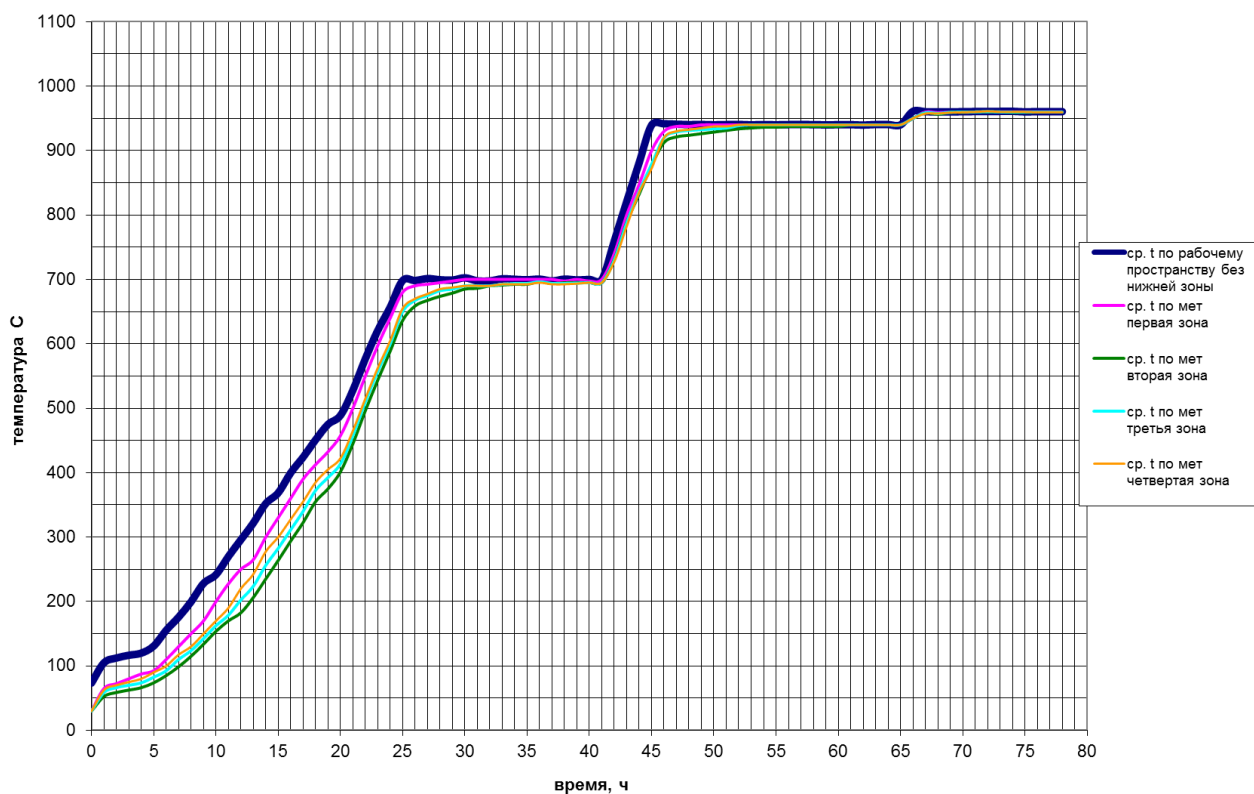


Рис. 7. Температурный режим печи №22 при нагреве ротора массой 27,26 т

Таблица 4

Тепловой баланс вертикальной термической печи № 22  
после технического перевооружения

Приход теплоты				Расход теплоты			
№ п/п	Статьи	кВт	%	№ п/п	Статьи	кВт	%
1	Химическая теплота топлива	419,7	79,1	1	Теплота на нагрев металла	62,3	11,7
2	Теплота подогретого воздуха	111,0	20,9	2	Потери теплоты с уходящими газами	301,4	56,8
				3	Потери теплоты теплопроводностью	81,4	15,3
				4	Нагрев приспособлений	11,4	2,2
				5	Аккумуляция теплоты футеровкой	74,2	14,0
	Суммарный приход теплоты	530,7	100		Суммарный расход теплоты	530,7	100

Отсюда, изменение показателей работы печи выглядит следующим образом:

- уменьшение абсолютного расхода топлива на 58,8 %;
- уменьшение удельного расхода топлива на 40 %;
- снижение потерь тепла вследствие теплопроводности и аккумуляции на 57 %, с уходящими газами – на 46 %.

#### Резюме:

Комплексное техническое перевооружение печи позволило прежде всего значительно улучшить качество нагрева металла, изменить основные теплотехнические показатели работы печи, обеспечить ведение теплового и температурного режимов полностью в автоматическом управлении.

Особо следует отметить применение рекуперативных скоростных горелок, работающих в автоматическом импульсном режиме, обеспечивающих интенсивную циркуляцию продуктов горения, резко повышающую равномерность нагрева поверхности изделия.

Замена стандартной кирпичной футеровки печи на керамо-волокнистую снизила тепловые потери в окружающее пространство и с аккумуляцией более чем на 50 %, значительно уменьшила материалоемкость и ускорила монтаж печи в целом.

Практика эксплуатации печей, подвергшихся техническому перевооружению по комплексной программе, показала достаточно быструю окупаемость примененных дорогостоящих оборудования и материалов.

В заключение необходимо сообщить, что на печи № 22 проведен эксперимент ускоренного охлаждения поковки ротора с помощью воздуха, подаваемого через скоростные горелки.

Были выдержаны заданные скорости охлаждения, что позволило дать рекомендацию на проведение комплексных режимов по нагреву и охлаждению изделий в одной печи без установки дополнительного оборудования. Результаты этого эксперимента будут опубликованы.

#### **Список использованных источников**

1. Китаев Б.И. Теплотехнические расчеты металлургических печей. 1-е изд. [Текст] / Б. И. Китаев, Б. Ф. Зобнин и др. – М.: Металлургия, 1970. – 528 с.
2. Гушин С. Н. Теория и практика теплогенерации / С. Н. Гушин, М. Д. Казяев, Ю. В. Крюченков и др.; под ред. В. И. Лобанова и С. Н. Гушина. – Екатеринбург: УГТУ, 2005. – 379 с.
3. Современные горелочные устройства (конструкции и технические характеристики): справочное издание / А. А. Винтовкин, М. Г. Ладыгичев и др. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 496 с.
4. Техническое перевооружение вертикальной камерной печи для термической обработки крупных поволоков / Д. И. Спитченко, А. М. Вохмяков, Е. В. Киселев, М. Д. Казяев, Д. М. Казяев // Известия вузов. Черная металлургия. 2013. № 9. С. 38–43.
5. Исследование тепловой работы вертикальной термической печи после технического перевооружения / Д. И. Спитченко, А. М. Вохмяков, Е. В. Киселев, М. Д. Казяев, Д. М. Казяев // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых уче-

ных (ТИМ'2013) с международным участием (28–29 марта 2013 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2013. С. 93–102.

6. Техническое перевооружение вертикальной камерной печи для термической обработки крупных поковок / Д. И. Спитченко, М. Д. Казяев, А. М. Вохмяков, Е. В. Киселев, Д. М. Казяев // Сборник докладов Международной научно-практической конференции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии» (18–21 сентября 2012 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 367–370.

УДК 669.18

**Л. В. Камкина, А. Г. Величко**

Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ И АНАЛИЗЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ**

### **Аннотация**

*Приведены дифференциальные уравнения, описывающие окислительные и восстановительные процессы, к безразмерному виду. Установлено, что в качестве характеристики скоростей окисления и восстановления элементов может быть использовано соответствующее число Дамкелера –  $Da_{[i]}$ . Величины чисел Дамкелера для углерода и кислорода в сталеплавильных процессах близки к единице, т. е. скорости реакций окисления и переноса одного порядка. При физико-химическом моделировании нестационарного состояния сталеплавильных процессов следует учитывать масштаб модели.*

*Ключевые слова: металлургические процессы; массообмен и теплообмен; дифференциальные уравнения переноса; число Дамкелера; потоки кислорода и углерода.*

### **Abstract**

*Differential equations describing the oxidation and reduction processes to dimensionless form. It is established that, as the characteristic velocity of oxidation and reduction elements can be used by appropriate Damköhler –  $Da_{[i]}$ . Values Damköhler number for carbon and oxygen in the steelmaking process are close to unity, oxidation reaction rate and the transfer of the same order. When physico-chemical modeling of unsteady state of steelmaking processes should take into account the scale of the model.*

*Keywords: metallurgical processes, mass transfer and heat transfer, differential transport equations, the number Damköhler; streams of oxygen and carbon.*

Металлургические процессы по своей природе представляют сложный комплекс газогидродинамических, тепломассообменных и физико-химических процессов, происходящих в плавильных агрегатах. Как отмечалось в трудах В. Е. Грум-Гржимайло, И. Д. Семикина: «Начинает и ведет печной процесс теплотехника, а заканчивает его технология. Теплотехни-